

ヒト触覚系におけるサブミクロンテクスチャー知覚

Submicron-texture-discrimination mechanisms in human tactile perception

宮岡 徹*

Tetsu MIYAOKA

The purpose of the present study was to determine the detection thresholds of very-fine textures in human tactile perception and to investigate mechanisms for the discrimination. Three experiments were performed. In Experiment 1, fine-abrasive papers with particle sizes between 0.1 and 9 μm were used as stimuli. Six subjects touched the stimuli with their index or middle fingers preferred and judged the roughness with the two-alternative, forced-choice technique. The temperature of the fingers was 35°C. The results showed that the detection threshold was 0.84 μm . In Experiment 2 and 3, six subjects judged the roughness of fine-abrasive papers when the finger temperatures were 18°C and 12°C, respectively. Other experimental procedure was same as in Experiment 1. The detection thresholds obtained in Experiment 2 and 3 were 1.51 and 1.44 μm , in that order. The results of three experiments showed that the mechanoreceptor which detected submicron textures was the Pacinian corpuscle.

1. はじめに

触ることにより対象表面の凹凸や粗さ・滑らかさを知ることが触テクスチャー知覚という。触テクスチャー知覚は、粗いテクスチャー知覚と微細テクスチャー知覚の2つに分けられると考えられている¹⁻⁵⁾。粗いテクスチャー知覚は、眼で見てもわかるような凹凸を触ることにより知覚する作用である。凹凸が密であったり、ランダムに配置されたりしているような状態では、触っても凹凸がわかるだけである。しかし、凹凸の密度が比較的低く、規則的に並ぶような場合は、点字に典型的に見られるようにパターンとして感じられる。粗いテクスチャーの知覚は、感覚代行者の開発に関連することもあり、集中的に研究された⁶⁻⁸⁾。その結果、粗いテクスチャー情報を中枢に送っている機械受容単位 (mechanoreceptive unit) は主に SA I (slowly-adapting-type-I unit; Merkel's disk) であることが明らかとなった⁹⁾。これに対し微細テクスチャー知覚に関する研究は比較的少ない。Hollins らは微細テクスチャー情報をキャッチする機械受容単位について研究を行い、FA II (fast-adapting-type-II unit; Pacinian corpuscle) が当該の受容単位であるとしている⁹⁾。

本研究の目的は、ヒトの触覚系がサブミクロンのテクスチャーを検出できるか否かを調べ、検出できるならその検出閾を測定すること、および非常に微細なテクスチャー知覚を可能にしている触情報処理メカニズムについて探究することであった。その際、ヒトの触覚を司る皮膚機械受容単位の温度感受性に着目した。皮膚機械受容単位は、その種類により温度感受性が異なり、皮膚温度を低くした場合、感度が下がるものと感度が変化しないものとに分けら

れる。そこで、複数の温度条件を設定することにより、サブミクロンテクスチャー知覚に關与する機械受容単位が推定できるものと考えた。

2. 実験 1

皮膚温度を 35°C として、非常に微細なテクスチャーの検出閾を測定することを実験 1 の目的とした。

2.1 方法

(1) 被験者： 5名の男子大学生と1名の女子大学生、合計6名が被験者として実験に参加した。いずれの被験者も20歳代であった。

(2) 刺激と実験装置： 刺激には6種類の精密研磨紙(住友3M)を用いた。カタログによれば、6種類の刺激のグリット値は2000, 4000, 8000, 10000, 15000, 20000であり、これらに対応する平均粒子径は、それぞれ9, 3, 1, 0.5, 0.3, 0.1 μm であった。走査電子顕微鏡(JEOL, JSM-5610LV)で精密研磨紙表面を観察した結果では、各刺激の平均粒子径はカタログ値を満たしていた。これらの精密研磨紙を20 mm×20 mmの正方形にカットし、縦横が20 mm×40 mm、厚さ10 mmのアルミ板の中央部に貼り付けて刺激として用いた。実験中は6種類の刺激から2種類を選び、刺激提示装置にセットした。

実験中は、手の皮膚温度と刺激の温度を温度制御装置によりコントロールした。温度制御装置は2つの部分から成っており、ひとつは手の皮膚温度を、もうひとつは刺激の温度をコントロールした。温度制御装置は恒温水循環装置(Yamato, CTE82W)に接続されており、5~45°Cの範囲で温度コントロールが可能であった。

(3) 実験手続： 6種類の刺激から重複を許して2種類の刺激を取り出す組み合わせ方は21種類となる。刺激の提示位置(左右)効果をキャンセルするための組み合わせを

2009年3月9日受理

* 総合情報学部 人間情報デザイン学科

考慮すると、すべての組み合わせ方は42種類となった。実験時には、被験者は椅子に腰かけ、視覚入力を防ぐためにアイマスクをつけた。また、粗さが聴覚的に判断されるのを防ぐために帯域雑音を流した。被験者は利き手の示指または中指1本で2つの刺激に触れ、どちらの刺激を粗く感じるかを2肢強制選択法により判断した。なお、刺激の表面には、接触時の摩擦を減少させるためにシリコンオイルを塗布した。各刺激組み合わせにつき、粗さ判断時間は最長20秒とした。また、刺激提示間隔は20秒とした。各被験者は刺激のすべての組み合わせにつき10回の試行を行った。それゆえ、各被験者の全実験試行回数は420回となった。刺激と被刺激皮膚部位は、実験中35℃に保たれた。

2.2 結果と考察

6人の被験者の実験結果を標準刺激ごとに整理し、心理測定関数を計算した。全データに基づく心理測定関数をFig. 1に示す。図の縦軸は標準刺激より比較刺激を粗いと判断した比率、横軸は比較刺激の粒子径をあらわす。図中の各曲線は、各標準刺激に対応する心理測定関数である。標準刺激の粒子径を凡例中に示す。

図を見ると、標準刺激が0.1, 0.3, 0.5 μm の心理測定関数は互いに重なり合う傾向がある。比較刺激が0.5 μm 以下の場合、3本の心理測定関数は平坦またはやや左上がりとなる。また、標準刺激が1 μm の心理測定関数は、上記の3本の心理測定関数より下方に位置する。標準刺激が3, 9 μm の心理測定関数は、さらに下方に位置する。

標準刺激0.1~0.5 μm の心理測定関数が重なり合い、しかも比較刺激0.5 μm 以下で曲線が平坦になる傾向があることは、被験者が0.1~0.5 μm の刺激を互いに区別でき

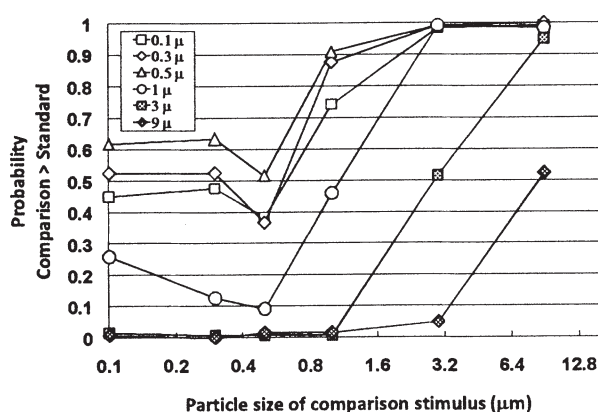


Fig. 1. Psychometric functions based on the data of Experiment 1. The vertical axis shows the probability that the comparison stimuli were judged to be rougher than the standard stimuli. The horizontal axis shows the particle sizes of the comparison stimulus. Each symbol in the figure shows the particle size of standard stimulus. The unit of the values in the legend is μm .

ないことを示す。これに対し、標準刺激1 μm の心理測定関数がこれらより下方に位置することは、0.1~0.5 μm の刺激と1 μm の刺激を区別できること、すなわち、刺激の表面テクスチャー検出閾が0.5 μm と1 μm の間にあることを示している。そこで、標準刺激が0.1, 0.3, 0.5, 1 μm の心理測定関数のデータに基づき、最小二乗法によりテクスチャー検出閾を計算した。その結果、平均検出閾は0.85 μm となった。

なお、標準刺激が0.1~0.5 μm の心理測定関数を詳細にみると、特に比較刺激が0.5 μm 以下の部分で、標準刺激が0.5 μm の心理測定関数は、標準刺激が0.1, 0.3 μm の心理測定関数の上方に位置する。これは、刺激の表面テクスチャーが非常に細かい場合、スティック・スリップ現象が生じたためと思われる。この現象では、指と刺激が貼りつき離れるという断続的な動きが起こる。刺激が0.1 μm と0.3 μm の場合、この断続的な動きを粗さと誤認し、0.5 μm より粗いと判断したものと思われる。

3. 実験2

実験2の目的は、皮膚および刺激温度を18℃として微細テクスチャー検出閾を測定することであった。

3.1 方法

- (1) 被験者： 4名の男子大学生と2名の女子大学生、合計6名が実験に参加した。いずれの被験者も20歳代であった。
- (2) 刺激と実験装置： 6種類の精密研磨紙を刺激とした。各刺激のグリット値は1200, 2000, 4000, 8000, 10000, 15000であり、それぞれの対応を平均粒子径でみると、12, 9, 3, 1, 0.5, 0.3 μm であった。実験に用いる際の刺激のカットサイズ、アルミニウム板への貼り付け方法、温度コントロール装置の仕組みなどは、実験1と同一であった。
- (3) 実験手続： 6種類の刺激から2つを取り出す組み合わせについては、実験1と同じ方法を採用した。その結果、刺激の組み合わせは42種類となった。実験時における被験者の姿勢、アイマスク着用、帯域雑音の提示等も実験1と同様とした。実験の際に使用した指、応答方法（2肢強制選択法）、判断時間、刺激間隔、各被験者の総実験試行数（被験者1人につき420回）も実験1と同一とした。刺激と刺激提示皮膚部位の温度は、実験中は温度制御装置により18℃に保たれた。

3.2 結果と考察

実験1と同様に、6名の被験者の実験結果を標準刺激ごとに整理し、心理測定関数を計算した。その結果をFig. 2に示す。なお、図中の凡例は標準刺激の粒子径（0.3~12 μm ）である。

図からわかるように、標準刺激が0.3~1 μm の場合、心理測定関数には互いにほぼ重なり合う。しかし、強いて言えば0.3, 0.5 μm の心理測定関数より1 μm の心理測定関数のほうが、わずかに下方に位置する。また、比較刺激が0.3~1 μm の部分では、心理測定関数にわずかに右上がりの傾向を示すことなどから、0.3, 0.5 μm の刺激より1 μm

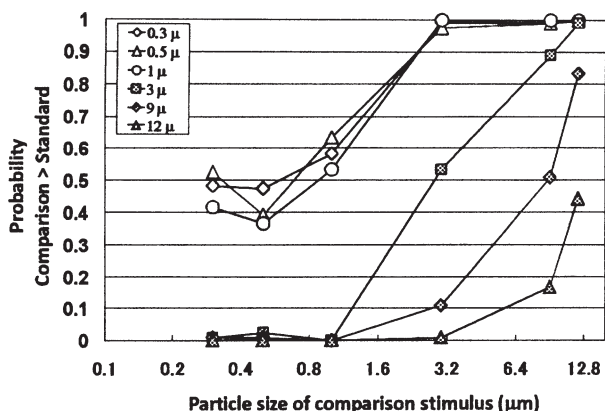


Fig. 2. Psychometric functions based on the data of Experiment 2. The vertical and horizontal axes represent the same contents as in Fig. 1.

の刺激をやや粗いと判断していることもわかる。ただし、比較刺激 $1\ \mu\text{m}$ はまだ検出閾レベルまで達していない。そこで、 $0.3, 0.5, 1\ \mu\text{m}$ の心理測定関数データの一部を使って微細テクスチャー検出閾を計算したところ、平均検出閾値は $1.51\ \mu\text{m}$ となった。

なお、実験 2 でも実験 1 と同じく比較刺激 $0.3\ \mu\text{m}$ のほうを比較刺激 $0.5\ \mu\text{m}$ の場合より粗いと答える比率が高かった。実験 2 でも、刺激表面テクスチャーが非常に細かい場合にはスティック・スリップ現象が生じ、刺激に触れる指先の断続的な動きを粗さと誤認したものと思われる。

4. 実験 3

実験 3 の目的は、皮膚および刺激温度を 12°C として、微細表面テクスチャーの検出閾を測定することであった。

4.1 方法

- (1) 被験者： 4 名の男子大学生と 2 名の女子大学生、合計 6 名が、被験者として実験に参加した。いずれの被験者も 20 歳代であった。
- (2) 刺激と実験装置： 5 種類の精密研磨紙を刺激とした。それらのグリット値は 1200, 2000, 4000, 8000, 10000 であり、これらを、塗布された酸化アルミニウム粒子の平均粒子径であらわすと、それぞれ $12, 9, 3, 1, 0.5\ \mu\text{m}$ であった。精密研磨紙は、実験 1, 2 と同じく $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ にカットし、アルミニウム板に貼り付けて刺激として用いた。被刺激部位皮膚および刺激の温度コントロール方法も実験 1, 2 と同様とした。
- (3) 実験手続： 5 種類の刺激から重複を許して組み合わせる重複組み合わせの数は 15 となる。刺激の提示位置の効果をキャンセルするための刺激位置入れ替えを考慮すると、組み合わせ数は 30 となった。実験時におけるアイマスク着用や帯域雑音提示等は実験 1, 2 と同様とした。実験の際に使用した指、応答方法（2 肢強制選択法）、判断時間、刺激間隔等も実験 1, 2 と同一とした。各被験者は刺激のすべての組み合わせにつき 10 回の試行を行っ

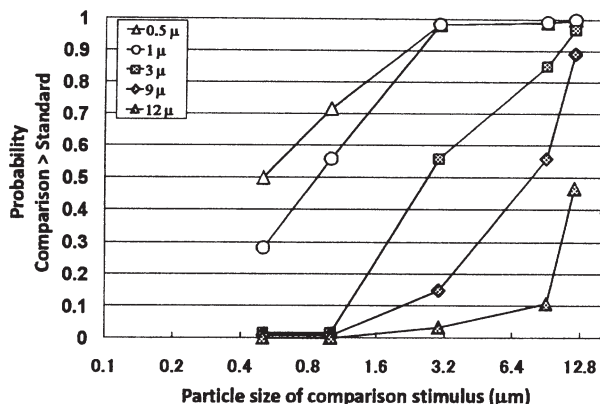


Fig. 3. Psychometric functions based on the data of Experiment 3. The vertical and horizontal axes represent the same contents as in Fig. 1 and Fig. 2.

たので、各被験者の全実験試行回数は 300 回となった。刺激と被刺激皮膚部位は、実験中 12°C に保たれた。

4.2 結果と考察

実験 1, 2 と同様に、6 名の被験者の実験結果を標準刺激ごとに整理し、心理測定関数を計算した。その結果を Fig. 3 に示す。図中の凡例は標準刺激の粒子径（ $0.5 \sim 12\ \mu\text{m}$ ）である。

図から明らかなように、いずれの心理測定関数も互いに重ならないことから、すべての刺激が大なり小なり互いに弁別されていることがわかる。しかし、たとえば標準刺激が $0.5\ \mu\text{m}$ で比較刺激が $1\ \mu\text{m}$ の場合、比較刺激のほうを粗いとする比率は 0.7 となり、まだ検出閾レベルには達していない。標準刺激が $0.5\ \mu\text{m}$ と $1\ \mu\text{m}$ の心理測定関数の一部を使って、最小二乗法により検出閾を計算した結果では、検出閾値は $1.44\ \mu\text{m}$ となった。

5. 総合考察

実験 1, 2, 3 で決定された平均検出閾値は、それぞれ $0.85, 1.51, 1.44\ \mu\text{m}$ となった。実験 1 では、皮膚温度は 35°C であり、この温度では検出閾値がサブミクロンレベルに達することがわかった。これに対し、皮膚温度が 18°C （実験 2）および 12°C （実験 3）では、検出閾値は $1\ \mu\text{m}$ 以上となった。

3 種類の皮膚温度条件の実験結果について、標準刺激 $1\ \mu\text{m}$ の場合の心理測定関数をまとめて Fig. 4 に示す。ただしこの図では、比較刺激が $0.5 \sim 9\ \mu\text{m}$ の範囲の心理測定関数が示されている。図中の白丸が 35°C 、薄灰丸が 18°C 、濃灰丸が 12°C の心理測定関数である。図を見るとわかるように、皮膚温度 35°C の心理測定関数は、皮膚温度 18°C 、 12°C の心理測定関数の下方に位置する。これに対し、皮膚温度 18°C と 12°C の心理測定関数は、互いに重なり合っている。比較刺激粒子径 $0.5\ \mu\text{m}$ （標準刺激粒子径は $1\ \mu\text{m}$ ）

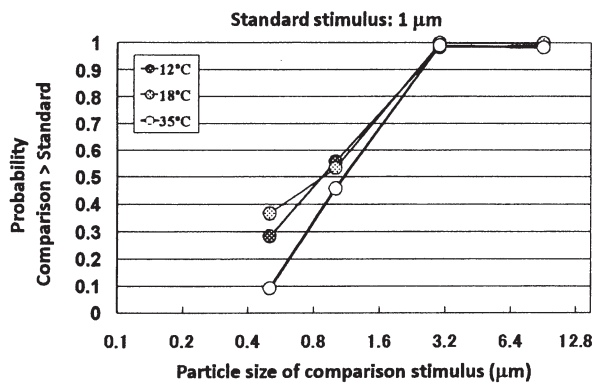


Fig. 4. An example of skin temperature effects on the detection thresholds of abrasive papers. The particle size of standard stimulus was 1 μm . Each symbol in the figure shows skin temperature. The skin temperatures were 35°C, 18°C, and 12°C for Experiment 1, 2, and 3, respectively.

の場合について、標準刺激より比較刺激を粗いと判断した比率を比較してみると、35°Cでは0.092となり、18°C、12°Cの結果に比べ、統計的に有意に低かった（35°Cと18°Cの比較； $t = 7.201$, $p < 0.001$ 。35°Cと12°Cの比較； $t = 2.945$, $p < 0.05$ ）。他方、18°C条件と12°C条件の間には、比率における有意差はなかった（ $t = -0.945$ ）。

皮膚温度条件の相違により実験結果にこのような差異があらわれた理由としてまず考えられることは、温度と皮膚機械受容単位感度の関係である。ヒトの無毛部皮膚（手指・手掌など）には触覚情報を受容する4種類の機械受容単位が存在する¹⁰⁾。これらは、振動刺激や皮膚温度への感受性においてそれぞれ異なる^{11),12)}。このうちFA II（fast-adapting-type-II unit; Pacinian corpuscle）は、振動に対する感度が非常に高く、また、皮膚温度が低くなると感度が低下するという特性を持つ。これに対し、FA I（fast-adapting-type-I unit; Meissner's corpuscle）はFA IIほど振動感度が低いものの、15°C付近まで皮膚温度を低下させても、感度はほとんど変化しない。また、SA I（slowly-adapting-type-I unit; Merkel's disk）の感度も、FA Iと同様に温度変化の影響を受けにくいとされている¹³⁾。

さて、微細テクスチャーを検出するには指を刺激上で動かす必要があり、このとき刺激の凹凸は振動として触覚系に提示される。触覚系はこの振動をテクスチャーとして知覚しているものと考えられる^{5),14),15)}。振動検出力を測定した結果によれば、FA IIの振動検出最小振幅は約0.1 μm 、FA Iの振動検出最小振幅は2~3 μm 、SA Iのそれは約10 μm である^{16),17)}。本研究の35°C（実験1）の結果では、検出閾値は0.85 μm であった。サブミクロンレベルの振幅を

検出できるのはFA IIのみである。また、FA IIは皮膚温度が低くなると感度が低下するが、皮膚温度18°C（実験2）と12°C（実験3）では、35°C（実験1）に比較し、統計的に有意な検出閾値の上昇、すなわち感度低下が観察された。これらのことから、サブミクロンレベルのテクスチャーを検出している皮膚機械受容単位はFA IIであると推測される。FA IIの振動検出閾0.1 μm に比べ、本研究におけるテクスチャー検出閾が0.85 μm とかなり大きな値となっているのは、滑らかな表面ではスティック・スリップ現象が起こりやすいためと推測される。この現象に起因する細かな振動が、被験者に「粗さ」と誤認されたものと考えられる。

18°C条件と12°C条件では、検出閾値に統計的な有意差がなかった。このことは、両温度条件下でテクスチャー検出に関与する機械受容単位感度が温度変化による影響を受けないタイプであることを示す。受容感度が温度変化の影響を受けにくい機械受容単位としては、FA IとSA Iがある。さて、FA Iの振動検出最小振幅は2~3 μm 、SA Iの振動検出最小振幅は約10 μm であり、他方、18°C条件におけるテクスチャー検出閾値は1.51 μm 、12°C条件におけるテクスチャー検出閾値は1.44 μm となっていた。これらの実験結果から見ると、18°Cと12°Cでの検出閾レベルにおけるテクスチャー検出閾と機械受容単位はFA Iの可能性が高いと推定される。

Fig. 4に示すように、18°C条件と12°C条件における心理測定関数は0.5~9 μm の範囲でほぼ同一のパターンを示した。このことから、この範囲の心理測定関数パターン決定に関与する機械受容単位は、皮膚温度が変化しても感度が変化しないという特性を持つことがわかる。比較刺激粒子径が3 μm までの刺激弁別には主にFA Iが関与すると考えられるが、粒子径9 μm の場合は、FA I、SA Iのどちらが関与しているか、あるいは双方が関与しているかは、本研究のみでは明確とはならなかった。

6. 結論

本研究では、粒子径0.3~12 μm の精密研磨紙を刺激として用い、手指末節で微細テクスチャー検出閾を測定した。その結果、皮膚温度が35°C（実験1）では、平均検出閾は0.85 μm 、皮膚温度が18°C（実験2）、12°C（実験3）では、検出閾はそれぞれ1.51 μm 、1.44 μm となり、皮膚温度が高い場合は、テクスチャー検出閾はサブミクロンレベルに達すること、皮膚温度が低下するとテクスチャー検出の感度も下がることがわかった。

本研究と先行研究の結果を考慮すると、35°Cでサブミクロンレベルのテクスチャー検出に関与する機械受容単位はFA IIであると結論づけられた。また、皮膚温度を下げ

ると1 μm 以下のテクスチャーは検出できなくなり、しかも皮膚温度18°C条件と12°C条件で実験結果に差が見られないことから、これら温度レベルでテクスチャーの「検出」に関与する機械受容単位は、温度変化の影響を受けず感度もよいFA Iの可能性が高いと推測された。それより大きな粒子径の場合、テクスチャーの「弁別」には、FAIまたはSAI、あるいはこれらの双方が関与していると考えられるが、本研究からは結論は得られなかった。

本研究では、ヒトの微細テクスチャー検出がサブミクロンレベルに達すること、その刺激検出に関与する皮膚機械受容単位がFA IIであることが明らかとなった。しかし、実験中にスティック・スリップなどの物理的ノイズを完全に取り除くことができなかったため、本研究結果がヒトの微細テクスチャー検出の真の限界値をあらわしているわけではないと思われる。工夫を重ねてスティック・スリップを取り除けば、さらに微細なテクスチャーが検出できる可能性がある。

謝辞

本研究実施に際しては、静岡理科大学学生鈴木孝幸君、三輪誠君、望月北斗君、木村嘉宏君、杉本有里さん、長尾希君の協力を得た。

引用文献

- 1) M. Hollins, "Touch and haptics", pp585-618, In S. Yantis (Ed), *Stevens' handbook of experimental psychology (third edition), Vol. 1: Sensation and perception*, (John Wiley & Sons, 2002).
- 2) M. Hollins, S. J. Bensmaïa and S. Washburn, "Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures", *Somatosensory & Motor Research*, **18**(2001)253.
- 3) M. Hollins and S. R. Risner, Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Perception & Psychophysics*, **62**(2000)695.
- 4) 宮岡徹, "触覚のモジュール機構", 静岡理科大学紀要, **3**(1994)85.
- 5) T. Miyaoka, T. Mano and M. Ohka, "Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation", *The Journal of the Acoustical Society of America*, **105**(1999)2485.
- 6) D. T. Blake, S. S. Hsiao and K. O. Johnson, "Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: the relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness", *The Journal of Neuroscience*, **17**(1997)7480.
- 7) C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips and K. O. Johnson, "Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates", *The Journal of Neuroscience*, **10**(1990)3823.
- 8) J. R. Phillips, R. S. Johansson and K. O. Johnson, "Representation of braille characters in human nerve fibres", *Experimental Brain Research*, **81**(1990) 589.
- 9) S. Bensmaïa and M. Hollins, "Pacian representations of fine surface texture", *Perception & Psychophysics*, **67**(2005) 842.
- 10) Å. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation", *Human Neurobiology*, **3**(1984)3.
- 11) S. J. Jr. Bolanowski and R. T. Verrillo, "Temperature and criterion effects in a somatosensory subsystem: a neurophysiological and psychophysical study", *Journal of Neurophysiology*, **48**(1982) 836.
- 12) T. Miyaoka, "Measurements of detection thresholds presenting normal and tangential vibrations on human glabrous skin", *Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, **20**(2004)465.
- 13) J. D. Greenspan and S. J. Bolanowski, "The psychophysics of tactile perception and its peripheral physiological basis", pp25-103, In L. Kruger (Ed.), *Pain and touch*, (Academic Press, San Diego, 1996).
- 14) Miyaoka and T. Nakamura, "Tactile-information-processing mechanisms of fine-surface-texture discrimination", *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, **23**(2007)391.
- 15) 宮岡徹, 中村敏男, "触覚系微細テクスチャー弁別の感覚情報処理機構", 静岡理科大学紀要, **15**(2007)25.
- 16) S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo and C. M. Checkosky, "Four channels mediate the mechanical aspects of touch", *Journal of the Acoustical Society of America*, **84**(1988)1680.
- 17) G. A. Gescheider, S. J. Bolanowski and K. R. Hardick, "The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system", *Somatosensory and Motor Research*, **18**(2001)191.